

基于全景理论的多微网聚合优化运行

徐意婷, 艾 芊

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 研究微网优化运行模式, 将全景理论(Landscape theory)应用在多微网系统中, 将微网聚合到一起运行以实现更好的效益。考虑微网不同分布式电源互补性, 定义了全景理论对应参数, 利用全景理论的能量函数将多微网进行分组聚合。在确定多微网聚合形式的基础上, 建立了考虑主网连接点(Point of common coupling, PCC)波动的微网能量优化模型, 对聚合前后的多微网能量优化结果进行对比分析。仿真算例表明, 聚合后各微网在实现自身经济性的同时提高了系统安全性, 证明了全景理论在多微网聚合方面应用的合理性和有效性。

关键词: 聚合; 全景理论; 分布式能源; 多微网; 经济调度

Optimal operation of multi-microgrid aggregation based on landscape theory

XU Yiting, AI Qian

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The operation modes of microgrid are researched and landscape theory is adopted in multi-microgrid systems to group microgrids in order to achieve better benefit. Complementarity of distributed energy resources is studied to define corresponding parameters in landscape theory, then landscape energy function is taken to group multi-microgrid. Based on the aggregation alignment of multi-microgrid, an optimization model considering interactive power fluctuation of PCC is proposed and the original values and the aggregation multi-microgrid energy optimal values are comparatively analyzed. The simulation result validates that the aggregation of microgrids increases individual economic benefit and enhances security of power system. So the validity and rationality of the application of landscape theory in multi-microgrid aggregation is proved.

Key words: aggregation; landscape theory; distributed energy resources; multi-microgrid; economic dispatch

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0050-07

0 引言

进入 21 世纪以来, 随着全球能源、环境问题日益凸显, 使得清洁能源和可再生能源利用的呼声日渐高涨, 其目标是以新能源和可再生能源逐步代替化石能源, 保证人类能源的可持续供应^[1-3]。微网为解决分布式发电和可再生能源利用的提供有效手段, 包含风电、光伏电池等清洁可再生能源, 增加了供电灵活性, 丰富了传统电网运行方式, 接入电网运行可实现节能减排, 降低系统网损以及提高供电可靠性和灵活性^[4-6]。

然而, 间歇性 DG 出力受环境气候影响极大, 具有明显的间歇性和不确定性, 使微网整体出力出

现波动, 通过 PCC 接入主网, 影响电力系统的正常运行^[7]。未来在多微网方式逐渐普及, 并占有电网发电和供电相当比例的情况下, 微网出力稳定性对电力系统有重要影响, 如何相应改变电网的管理模式及运行控制方式, 成为必需研究解决的理论和实际问题^[8]。聚合是将系统中的成员以一定形式组合起来, 使高兼容性的成员聚在一起而低兼容性的成员分开, 聚在一起成为聚合体。聚合体相比于个体有更强的适应能力, 并更利于管理调度。所以在多微网系统中, 如何选择多微网聚合方式以及聚合后的协同优化运行模式, 使系统运行在安全经济的状态, 是需要研究的一个重要方向。

在单微网优化运行方面, 研究已比较成熟。文献[9]在详细分析了分布式电源特性和优化目标数学模型的基础上, 提出了一种基于小生境进化的

多目标免疫算法, 对微网中分布式电源出力进行优化管理。文献[10]以钠硫电池为储能研究对象, 建立了包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化模型, 分析讨论了多种因素对系统经济运行优化结果的影响。文献[11]提出考虑微源同时提供有功和无功出力并计及制热收益的热电联产型微网系统多目标经济调度模型, 优化考虑实时电价的并网运行方式下各微源的有功、无功出力和多目标优化的满意度, 对比分析单目标与多目标系统优化值。上述优化运行都只考虑了微网经济性, 而没有考虑到微网出力的稳定性问题。

在多微网调度方面, 文献[12]研究微网与电网协调运行模式, 提出了一种基于互动电网的含多微网电力系统的调度模式, 建立了微网与电网联合调度模型。文献[13]提出了离网型邻近海岛多微网联合运行的方案, 在发电预测与负荷预测的基础上, 基于可靠性与经济性指标建立了多微网运行的不确定性优化调度模型。上述文献都是在已经确定的多微网协作模式下进行优化调度, 没有从根本出发考虑何种微网聚合模式为最好的。

本文将聚合的全景理论应用在多微网系统中, 在考虑微网聚合形式的基础上, 建立了考虑PCC波动的微网能量优化模型, 对聚合前后的多微网进行能量优化。对比结果可知, 聚合后各微网在实现自身经济性的同时提高了系统安全性, 证明了全景理论在微网聚合方面应用的有效性。

1 全景理论

1.1 全景理论概念

聚合是将一个系统中的成员以一定形式组合起来, 使高兼容性的成员集中而低兼容性的成员分开, 聚在一起的成员成为聚合体。聚合体相比于个体有更强的适应能力, 并更利于管理调度。全景理论作为一种聚合理论最先由Axelrod和Bennett于1993年提出, 它可以预测成员聚合的最佳分组情况, 预测分组模型的能量函数以成员损耗度减小为基础, 最终达到整个系统能量全景的最小值。全景理论所具备的预测性与正确性被二战时期17个欧洲国家的抗战实际情况所验证, 也有被广泛的应用在政党、社交网络等方面的潜力^[14]。本文将全景理论应用在多微网能量优化中, 算例结果验证了其合理性。

全景理论适用于一个有 n 个成员的系统, 每个成员有一个规模参数 s_i , 表现这个成员对其他成员的重要度。规模可以由多种因素联合计算得到, 因素的选取由它们在不同情况的应用中各自的重要

程度决定。成员和成员之间有一个匹配度参数 p_{ij} , 表示它们愿意一起工作的意向。匹配度越大, 表明两个成员能够友好相处愿意一起工作; 反之匹配度越小, 表明两个成员之间存在一些冲突不愿意一起工作。分组的模型用 X 表示, 其情况决定了两个成员之间的距离 d_{ij} 。

有了以上参数就可以定义损耗度计算式:

$$F_i(X) = \sum_{i \neq j} s_j p_{ij} d_{ij}(X) \quad (1)$$

式中: s_j 是 j 的大小规模; p_{ij} 是 i 对 j 的匹配度; $d_{ij}(X)$ 是 i 和 j 在模型 X 中的距离。一般情况下, 当两个成员 i 、 j 在同组内时 $d_{ij}(X)$ 为0, 当它们在不同组内时 $d_{ij}(X)$ 为1。

由此可以定义系统能量模型:

$$E_i(X) = \sum_i s_i F_i(X) \quad (2)$$

将损耗度计算式代入可得:

$$E_i(X) = \sum_{i,j} s_i s_j p_{ij} d_{ij}(X) \quad (3)$$

全景理论以每个成员希望减少自身损耗度而做出的行为作为分组依据, 一次只允许一个成员进行移动换组, 并且这个行为会使它自身的损耗度降低。如果一个成员的损耗度降低了, 其他成员的损耗度也会降低, 从而全局的能量降低; 反之如果全局能量降低了, 成员损耗度也降低了^[15]。

从系统的能量模型也可以看出, 系统能量由成员的规模、一起工作的匹配度和它们之间的距离决定。当两个愿意一起工作的成员在同一个分组而不愿意在一起工作的在不同分组时, 系统的能量越低, 成员损耗度越低, 所以当系统能量达到最小值时有最佳的聚合情况。

总之, 根据全景理论的系统能量函数可以确定最优的聚合分组方式, 这也是本文研究多微网能量优化的思路所在。

1.2 全景理论在多微网能量优化的应用

要将全景理论应用在多微网能量优化中, 首先需要将全景理论中的各个参数与多微网对应起来。

微网作为成员, s_i 为微网 i 的规模, 表现它对其他微网的重要度, 可由微网中DGs容量总和决定。微网中DGs容量总和越大, 表明它出力的可调节范围越大, 对其他微网越重要。本文采用微网 i 、 j 中不同DGs的互补性间接反映它们之间的匹配度, 定义如下:

假设 $F_i = \{1, 2, \dots, q, \dots, m_i\}$ 和 $F_j = \{1, 2, \dots, r, \dots, m_j\}$ 表示两个微网的DGs种类和个数情况。不同的数字

分别表示不同的 DG，数字重复几次表示有几个同类型 DG。

对 $r \in F_j$ ，定义 $s_i(r)$ 为 r 对 i 的吸引力。考虑到不同 DGs 之间的互补性， $s_i(r)$ 的计算方法如下：

$$s_i(r) = \sum_{q=1}^{m_j} s_q(r) \quad (4)$$

其中

$$s_q(r) = \begin{cases} -1, & r = q \\ +1, & r \neq q \end{cases} \quad (5)$$

上式的意义是：当 DG 不同时体现出 DG 互补性，有 $s_q(r) > 0$ ，DG 相同时存在随机性进一步扩大造成微网出力更大波动的可能，所以令 $s_q(r) < 0$ 。在具体算例中，根据微网各个 DGs 的属性，比如 PV、WT 的随机性影响较大， $s_q(r)$ 的定义会比上式复杂一些，在之后的算例中会具体说明。

各微网内部 DGs 的互补性决定了微网之间的匹配度，于是可以得到微网 i 、 j 之间的匹配度：

$$p_{ij} = \sum_{r=1}^{m_j} s_i(r) / m_i \quad (6)$$

通过上述参数的定义，就可以利用全景理论能量函数求解微网最佳分组，也就是多微网聚合运行情况，程序流程图如图 1 所示。

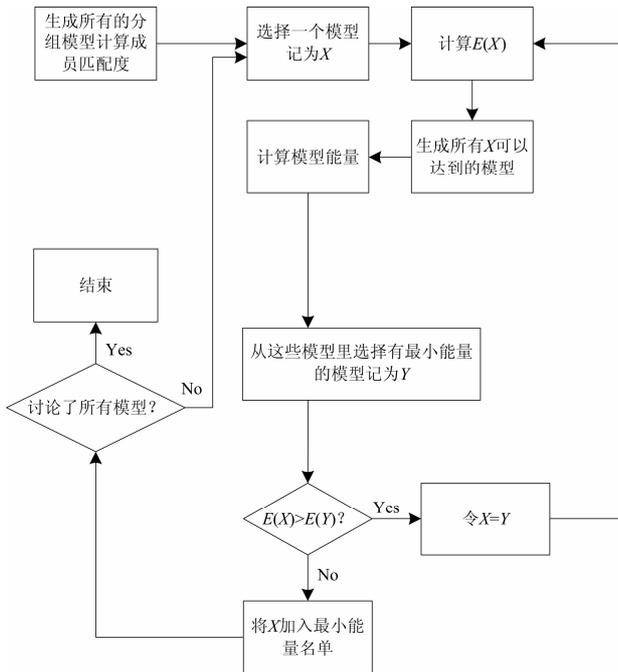


图 1 全景理论能量计算流程

Fig. 1 Flow chart of the landscape theory

2 多微网优化运行

2.1 目标函数

假设微网只作为电源向电网供电，配网层已经进行了上层优化，电网调度 MG1 和 MG2 的功率为电网层面的最优功率，但是由于 WT、PV 的随机性，微网可能并不能够按电网所需调度与主网进行能量交换，造成 PCC 处的功率波动，继而影响电网安全稳定运行。而在 MG1 和 MG2 聚合后通过控制它们之间的功率交互可以使 PCC 处功率波动减小，这是体现聚合意义的一个重要的指标。基于此，微网层优化运行的目标为发电成本与 PCC 波动产生的违约成本之和最小，目标函数为

$$\min F = C_{\text{cost}} + C_{\text{PCC}} = C_{\text{fuel}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{DEP}} - I_{\text{SE}} + C_{\text{PCC}} \quad (7)$$

其中：

$$C_{\text{fuel}} = \int_0^T \sum_{i=1}^N K_{\text{fuel}i} P_{it} dt \quad (8)$$

$$C_{\text{OM}} = \int_0^T \sum_{i=1}^N K_{\text{OM}i} P_{it} dt \quad (9)$$

$$C_{\text{DEP}} = \int_0^T \sum_{i=1}^N \left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right) \left(\frac{C_{\text{inv},i}}{8760k} \right) P_{it} dt \quad (10)$$

$$I_{\text{SE}} = \int_0^T c_{\text{st}} P_{\text{pcc}t} dt \quad (11)$$

$$C_{\text{pcc}} = \int_0^T c_{\text{vio}} (P_{\text{pcc}t} - P_{\text{pcc}})^2 dt \quad (12)$$

式中： C_{fuel} 为微网系统燃料成本； C_{OM} 为微网系统的运行维护成本； C_{DEP} 为微网系统各 DG 安装折旧成本； I_{SE} 为微网向主网售电收益； C_{pcc} 为 PCC 处违约成本； P_{it} 为 DG i 在 t 时候的有功功率输出； $K_{\text{fuel}i}$ 为 DG i 的单位燃料成本； $K_{\text{OM}i}$ 为 DG i 的单位运行维护成本； $C_{\text{inv},i}$ 为 DG i 的安装成本年平均费用； r 为折旧率； k 为平均容量系数， $k = \text{年发电量} / (8760 * \text{系统额定功率})$ ； n 为 DG 使用寿命； $P_{\text{pcc}t}$ 为微网与主网的实际交互功率； c_{st} 为微网向主网售电电价； P_{pcc} 为电网调度微网的优化功率； c_{vio} 为 PCC 处的单位违约成本。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_{\text{load}t} = \sum P_{it} - P_{\text{pcc}t} \quad (13)$$

式中： $P_{\text{load}t}$ 为 t 时刻微网总的有功负荷； $\sum P_{it}$ 为 t 时刻微网中所有 DG 出力之和。

(2) DG 出力约束

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (14)$$

式中, $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别为第 i 个 DG 有功功率的最小、最大值。

(3) 微型燃气轮机爬坡率约束
增负荷时, 有

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq R_{up,MT} \quad (15)$$

减负荷时, 有

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \leq R_{down,MT} \quad (16)$$

式中, $R_{up,MT}$ 、 $R_{down,MT}$ 分别为 MT 增加和降低有功功率的限值。

3 算例分析

3.1 多微网聚合分组

本文所采用的系统包括三个微网 MG1、MG2 和 MG3, 其中 MG1 包括 1 个太阳能光伏电池 (Photovoltaic, PV)、1 个风力机组 (Wind turbine, WT)、1 个微型燃气轮机 (Micro-turbine, MT)、1 个燃料电池 (Fuel Cell, FC) 共四种电源; MG2 包括 1 个风力机组、1 个微型燃气轮机、2 个燃料电池共三种电源, MG3 包括 2 个风力机组、1 个太阳能光伏电池、1 个微型燃气轮机共三种电源。风力机组、太阳能光伏电池、燃料电池和微型燃气轮机的容量分别为 45 kW、10 kW、30 kW 和 30 kW。

3.1.1 参数设置

由已知微网参数, 可得出各微网的规模见表 1。

表 1 微网规模

Table 1 Size of microgrid

编号	1	2	3
规模 S_i / kW	115	135	95

序号 1、2、3、4 分别对应 WT、PV、MT、FC, 令 $F_1=\{1,2,3,4\}$ 、 $F_2=\{1,3,4,4\}$ 和 $F_3=\{1,1,2,3\}$ 分别表示 3 个微网的 DGs 种类和个数情况。 $s_q(r)$ 的计算方法如下:

$$s_q(r) = \begin{cases} +3, & r = 4 \text{ 且 } r \neq q \\ +1, & r \neq 4 \text{ 且 } r \neq q \\ 0, & r = q = 4 \\ -5, & r = q \neq 4 \end{cases} \quad (17)$$

上式表征数值的意义是: 当 $r \neq q$ 时, DG 类型不同拥有互补性质, r 对 q 表现为积极, 即 q 愿意与 r 在一起工作, 所以 $s_q(r) > 0$; 其中当 $r=4$ 时, r 为 FC, 由于 FC 出力约束较少调度方便, 其他 DG 对它的希望更大, 互补性更明显, 因此 $s_q(r) = +3$ 。当 $r=q$ 时, DG 相同不具备互补性, 且当它们都为 PV、WT 时, 其随机性增大, 使微网

出力波动性增大, 此时 $s_q(r) = -5$, 表明 q 极度不愿意与 r 在一起工作; 其中当它们都是 FC 时, 对彼此的希望处于平衡状态, 在一起工作与否对全局影响不大, 所以设置 $s_q(r) = 0$ 。因此, $s_q(r)$ 的设置方式体现了不同 DG 间互补性的强弱。

通过上述参数可以求得 MG1、MG2 和 MG3 三个微网之间的匹配度矩阵 $\{p_{ij}\}_{3 \times 3}$ 如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3.5 & -2 \\ 1.5 & 0 & -0.5 \\ 0 & 3.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.1.2 全景能量计算

通过参数设定, 由广义全景理论的能量函数可以求出多微网各个聚合分组情况的能量, 能量最低点对应的分组模型即为最佳分组, 也就是最佳的聚合运行情况。计算结果如表 2 所示。

表 2 多微网聚合能量结果

Table 2 Energy of multi-microgrid aggregation

模型编号	分组方式	能量
1	1,2,3	94 250
2	12,3	16 625
3	13,2	116 100
4	1,2,3	55 775
5	123	0

由聚合的能量值可以看出: 由于 MG3 的 DG 设置比较极端, 由随机性很强的 WT、PV 以及带有调度约束的 MT 组成, 出力的波动性比较高, 所以 MG3 对含 FC 较多调度更加灵活的 MG2 的希望很高, p_{32} 很大, 但是对 MG2 来说却不希望跟 MG3 一起工作, p_{23} 为负值; 此外, MG1 也不希望跟 MG3 一起工作, p_{13} 也是负值, 所以 MG3 跟 MG1 或者 MG2 聚合的分组方式都不是能量最低点。而 MG1 和 MG2 各方面的互补性都很好, p_{12} 和 p_{21} 都为正数, 表明它们都希望彼此能够聚合一起工作, 所以将 MG1 和 MG2 聚合在一起的分组方式具有最低的能量。其中分组方式 5 是将三个微网全部聚合在一起, 但是将已有的多微网单纯的聚合成为一个较大的微网只会让其失去本身作为多微网的优越性, 这种组合方式虽然能量可以达到最低但是并没有实际意义, 所以本文在计算分组模型的过程中将其去除, 从而可以得到最佳的分组方式是方式 2。下面将对方式 2 聚合后的效果进行优化运行仿真和分析, 优化结果证明了全景理论用于多微网聚合的正确性。

3.2 多微网聚合优化运行

通过计算分组方式 1 和分组方式 2 的优化运行结果并进行对比, 验证全景理论的正确性。由于两种分组方式 MG3 都是单独运行的, 与 MG1、MG2 之间没有能量交互, 也就是说从三个微网单独运行到 MG1 和 MG2 聚合后, MG3 的运行方式不会发生变化, 所以我们只对 MG1 和 MG2 进行仿真分析。选择序列二次规划(sequential quadratic programming, SQP)算法求解约束优化问题, 并对聚合前后的优化结果进行讨论。

3.2.1 微网结构与数据

算例中微网数据如前所述, 表 3~表 4 给出了各分布式电源的具体数据和分时电价。假设两个微网中的光伏电池、风机出力 and 负荷曲线相同, 图 2~图 4 给出了负荷、光伏电池和风机出力曲线, 其中光伏电池和风机出力曲线采用概率的方法生成以体现它们的随机性^[16]。电网调度 MG1 和 MG2 的最优功率均为 25 kW。

3.2.2 优化结果及讨论

MG1 和 MG2 聚合前独立运行和聚合后共同运行时的优化结果如表 5 所示。

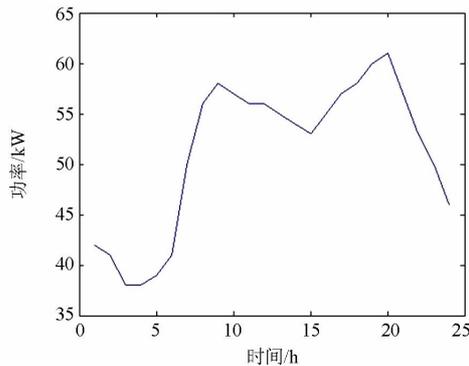


图 2 负荷功率
Fig. 2 Load power

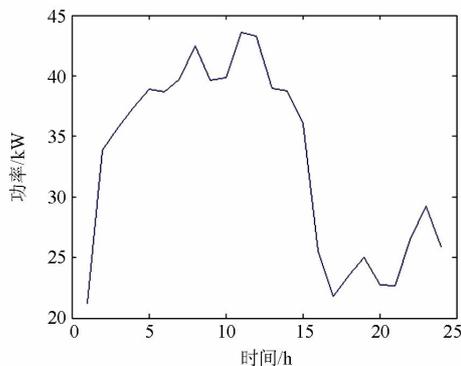


图 3 风电随机功率
Fig. 3 WT random power

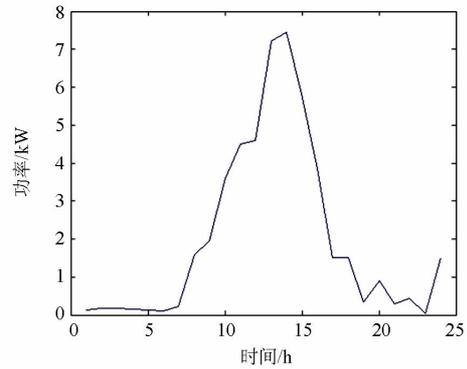


图 4 光伏随机功率
Fig. 4 PV random power

表 3 不同 DG 参数
Table 3 Parameters of DGs

分布式电源类型	投资安装成本/ (万元/kW)	寿命/年	出力上限/kW
微型燃气轮机	1.2	10	30
燃料电池	1.95	10	30
风机	1.2	10	45
光伏电池	2	10	10

表 4 实时售电价
Table 4 Electricity price

时段	1	2	3	4	5	6
电价	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
时段	7	8	9	10	11	12
电价	0.13	0.38	0.38	0.38	0.65	0.65
时段	13	14	15	16	17	18
电价	0.65	0.65	0.65	0.38	0.38	0.38
时段	19	20	21	22	23	24
电价	0.65	0.65	0.65	0.38	0.38	0.13

注: 电价/(元/kW·h)

表 5 聚合前后微网成本

Table 5 Cost of microgrids before and after aggregation

	微网编号	运行成本/元	违约成本/元	总成本/元
聚合前	1	326.402 5	3.686 9	330.089 4
	2	180.984 3	0.890 9	181.875 2
聚合后	1	327.812 7	1.030×10 ⁻⁶	327.812 7
	2	181.283 0	0.190 5	181.473 5

由所得结果可以看出: MG1 和 MG2 聚合后的经济性都提高了, 总成本都有一定降低, 是它们愿意跟对方聚合在一起工作的表现。其中 MG1 的总成本降低了 2.097 9 元, MG2 降低了 0.401 7 元,

MG1 降低的更多而 MG2 只降低了很小一部分, 表明聚合后 MG1 受益更大, 它对于与 MG2 的一起工作的愿望更强。总之, 上述结果可以说明 MG1 和 MG2 聚合后都能够有更好的经济效益。

本文将微网向电网供电时 PCC 产生的波动转换成违约成本来衡量微网向电网供电的稳定性, 可以减小微网由于内部 DG 的随机性而导致微网出力的波动性。由表 5 结果也可以看出, 聚合后 MG1 的违约成本几乎为 0, PCC 波动十分微弱。微网聚合优化前后 MG1 和 MG2 的 PCC 的波动情况如图 5~图 6 所示。

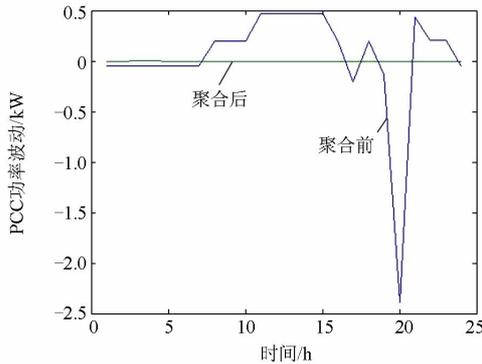


图 5 MG1 的 PCC 功率波动

Fig. 5 Power fluctuation of MG1's PCC

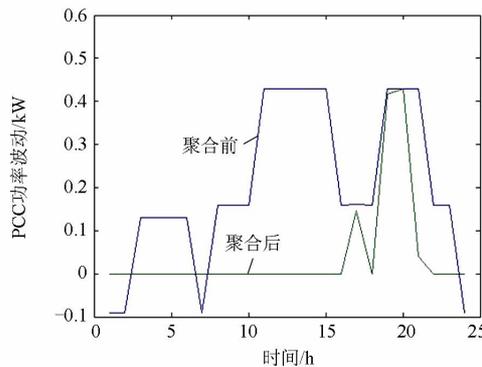


图 6 MG2 的 PCC 功率波动

Fig. 6 Power fluctuation of MG2's PCC

由图可以很直观地看出: 在 MG1 和 MG2 聚合前, MG1 的 PCC 波动很大, 特别在 20 点达到 -2.5 kW, 严重影响了电网稳定性; 而 MG2 的 PCC 波动相对较小, 最大值在 0.4 kW 左右, 说明 MG2 自身比 MG1 更加稳定。在微网聚合后, 由于不同微网 DGs 之间的存在一定互补性, MG1 和 MG2 出力的波动都得到了一定抑制作用。其中图 5 所示的 MG1 在聚合后波动情况很小, 几乎为 0, MG2 对它起到了一个很好的帮助作用; 图 6 所示的 MG2 在聚合后的波动情况也有改善, 但是在 20 点左右

波动虽然跟聚合前相比有所减小但是依然比较大, 说明 MG1 对 MG2 的整体帮助作用一般。对比 MG1 和 MG2 聚合后 PCC 波动情况, 容易发现 MG2 对 MG1 的帮助明显大于 MG1 对 MG2 的帮助, 这是由于微网内部 DGs 互补性不同造成的不对称造成的。而之前的全景能量分析时, MG1 和 MG2 之间的匹配度 $p_{12} > p_{21}$, 表明 MG1 对 MG2 一起工作的希望更大, 所以 MG2 可以更好的帮助 MG1, 使 MG1 出力更加稳定。以上优化结果也验证了 MG1 和 MG2 在全景理论中作为成员之间的匹配度设定的正确性。

综上所述, 多微网聚合优化后, 各个微网在经济性上都有所提升, 在供电波动性上都更加稳定, 体现了多微网聚合的意义, 证明了全景理论能量判定方法的正确性。

4 总结

本文提出了将聚合的全景理论应用在多微网系统中, 将微网聚合到一起以实现更好效益。首先根据全景理论, 通过对微网不同 DG 互补性的分析, 定义了相应参数; 在此基础上利用能量函数将多微网进行分组聚合, 聚合后微网之间可以互相帮助实现共同工作。之后, 建立了考虑 PCC 波动的微网能量优化模型, 对聚合前后的微网进行能量优化。对比结果可知, 通过聚合, 微网间进行相互帮助, 能有效减小微网出力不确定性对电网造成的影响, 在实现自身经济效益最大化的同时提高了系统安全性, 证明了全景理论在微网聚合方面应用的有效性。

参考文献

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [2] MARKVART T. Microgrids-power systems for the 21st century[J]. Refocus, 2006, 7(4): 44-48.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于 2 层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33.
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent

- distributed generation and reactive power compensation based on bilevel planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33.
- [5] 张明锐, 陈洁, 杜志超, 等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1013-1023.
ZHANG Mingrui, CHEN Jie, DU Zhichao, et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [6] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31.
- [7] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu. Impacts of distributed generation on steady-state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [8] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18.
- [9] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [10] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/s battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [11] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-67.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 57-67.
- [12] 艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.
AI Xin, XU Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.
- [13] 周永智, 吴浩, 李怡宁, 等. 基于MCS-PSO算法的邻近海岛多微网动态调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 204-210.
ZHOU Yongzhi, WU Hao, LI Yining, et al. Dynamic scheduling of neighboring island multi-microgrid based on MCS-PSO algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 204-210.
- [14] AXELROD R, BENNETT S D. A landscape theory of aggregation[J]. British Journal of political Science, 1993, 23(2): 211-233.
- [15] KIJIMA K. Generalized landscape theory: agent-based approach to alliance formations in civil aviation industry[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2001, 14(2): 113-123.
- [16] 柳丹, 李强, 袁晓东. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2014-12-15

作者简介:

徐意婷(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电和微网能量优化; E-mail: millyx@sjtu.edu.cn

艾芊(1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为电能质量、人工智能以及在电力系统中的应用、电力系统元件建模、分布式发电等。

(编辑 张爱琴)